

魚野川流域における融雪流出解析の総合化

Synthesizing the Snowmelt Runoff Analysis in the Uono River Basin

長岡技術科学大学建設系 正員 小池 俊雄 Tosio KOIKE
 長岡技術科学大学建設系 正員 早川 典生 Norio HAYAKAWA
 長岡技術科学大学建設系 正員 後藤 巖 Iwao GOTO
 長岡技術科学大学大学院 古谷 浩 Hiroshi FURUYA
 長岡技術科学大学工学部 学生員 八田 茂実 Shigemi HATTA

Snowmelt runoff analysis consisting of three submodels is developed. These submodels are the model for estimation of basin-wide snow water equivalent using snow covered area, the model for estimation of basin-wide snowmelt rate and the runoff model. In each model we use the information on snow covered area derived from LANDSAT MSS data. The meteorological data from AMeDAS is used also. We apply these models to the Uono River Basin in NIIGATA, during the snowmelt season in 1979, 1981, 1982. The results of model applications are in good agreement with observed data.

[Key words: Snowmelt runoff analysis, Remote sensing]

1. はじめに

融雪流出解析は、初期値である流域積雪水量の推定、入力値である流域融雪量の推定、変換系である流出過程の検討の3段階に分けて考えることができる。このうち、流域積雪水量の算定に関しては積雪面積情報を用いたリアルタイムな推定法が¹⁾、また融雪量に関しては流域を小メッシュに分割し各メッシュ毎の融雪量を推定する分布型融雪量算定モデルが提案されている²⁾。さらに融雪流出過程においては河川水の電気伝導度を用いた流出成分の分離と各成分に対応する流出のモデル化が試みられている³⁾。本研究ではLANDSAT MSSデータにより得られる積雪面積情報を用いて、流域積雪水量の推定・流域融雪量の推定・融雪流出量の算定を行い、実河川における融雪流出解析の総合化を行った。

2. 対象流域・水文データの概要

本研究で対象とした流域は信濃川の支川である魚野川上流域で、流域面積は355km²、高度分布が165～2025mの流域である。流域の概況を図1に示す。解析期間の気象要素は同流域内で雨量観測が3地点、気温・日照時間の観測が1地点で行われており、また、融雪流出解析において重要となる積雪面積データは、本研究では1979.3.29, 5.04, 5.22, 1981.3.18, 4.23, 1982.5.15のLANDSAT MSSデータ6シーンをを用いてデジタル解析により抽出した。デジタル解析は、まず流域を囲む3カ所のGCP (Ground Control Point)の地図および画像座標を求め、幾何補正を行い、最近隣法 (Nearest Neighbour法)によりメッシュ化された図上に再配列する。GCPは、バンド6を用いて識別の容易であるダムや河川の合流点を用いた。積雪域の判別には、バンド5を用いて日陰の積雪域と森林の無雪域を抽出し、両域のCCTカウントから積雪域と無雪域に分類し、流域積雪面積率を算定した¹⁾。この結果得られた積雪面積情報を図2に示す。

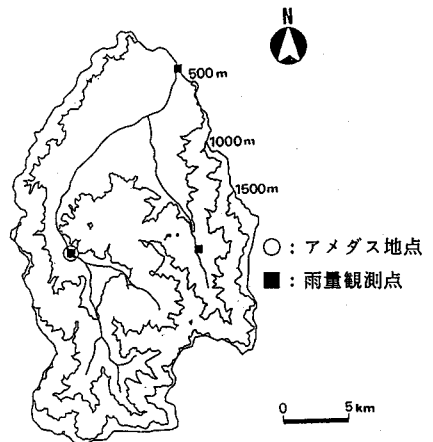


図1. 対象流域の概況



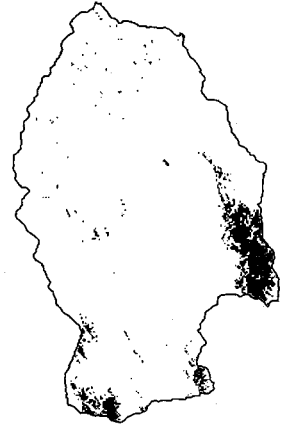
(a) 1979. 3. 29

$A_s = 59.6\%$



(b) 1979. 5. 4

$A_s = 15.4\%$



(c) 1979. 5. 22

$A_s = 6.2\%$



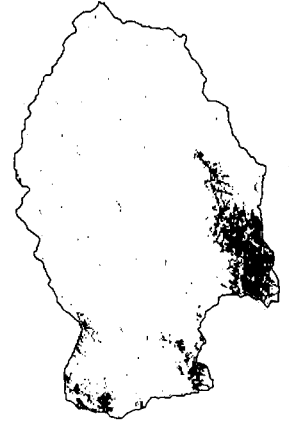
(d) 1981. 3. 18

$A_s = 97.3\%$



(e) 1981. 4. 23

$A_s = 92.5\%$



(f) 1982. 5. 15

$A_s = 7.9\%$

図2. 積雪面積情報の収集 (■ 積雪域)

3. 流域積雪水量の推定

本研究で用いた流域積雪水量算定モデルは、小池・高橋・吉野により提案されている積雪面積情報を用いた次式によった¹⁾。(記号は文献1)を参照)

$$S_s = \begin{cases} \frac{ax_m(H_H - H_L)}{p+2} \left(\frac{p+1}{x_m} \right)^{\frac{1}{p+1}} (1 - A_s)^{\frac{p+2}{p+1}} + \delta S_s & (A_{sm} \leq A_s \leq 1) \\ \frac{a(1-x_m)(H_H - H_L)}{q+2} \left(\frac{q+1}{k(1-x_m)} \right)^{\frac{1}{q+1}} A_s^{\frac{q+2}{q+1}} & (0 \leq A_s \leq A_{sm}) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、

$$\delta S_s = a(H_H - H_L) \left[x_m - x_m \left\{ \frac{p+1}{kx_m} (1 - A_s) \right\}^{\frac{1}{p+1}} + \frac{k(1-x_m)^2}{(q+1)(q+2)} - \frac{kx_m^2}{(p+1)(p+2)} \right] \quad (2)$$

p, q, x_mは流域の地形特性に依存する係数で、100mメッシュ標高データを用いて魚野川流域の地形特性を解析した結果、p=x_m=0, q=1が得られた。したがって同流域における積雪水量算定式は(1)式より、

$$S_s = 620 \cdot a \cdot A_g^{3/2} \quad (3)$$

となる。ここでaは流域平均の積雪水量の高度分布特性を表す係数で、水収支式による積雪水量の観測値を用いて同定した。図3は同定の結果を表わしている。この図中で1981.3.18はまだ雪線が流域内に現れていない時期であり、積雪面積情報による流域積雪水量推定の範囲外である。これを除くと、1979年の少雪、1981年の豪雪、1982年の平年並と積雪条件が異なるにも関わらず推定式が一致しており、魚野川流域においては積雪面積率を観測することにより(3)式を用いて流域積雪水量を推定できることが示された。

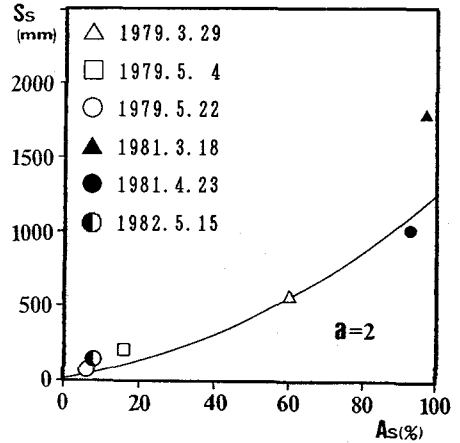


図3. 流域積雪水量の算定

4. 流域融雪量の推定

流域融雪量の推定は小池・高橋・吉野によって提案された次式の分布融雪量推定モデルを用いた²⁾。

(記号は文献2)を参照)

$$M = \frac{0.332I \left(\frac{T_6 - 18 + 273}{273} \right)^4 - 33.4 \Delta T_{18-21} \left(\frac{273}{T_{18} + 273} \right)^4 + 3.0}{8} + 0.102d.h. + \frac{2.49 \Sigma (e_{sat} - 6.1) + \frac{PT_p}{10}}{8} \quad (4)$$

ここで、融雪量分布に及ぼす斜面の効果は(4)式中の日射量を太陽南中時の受光係数で補正することによって表す。任意のN地点における受光係数は次式により求められる。

$$S_N = \sqrt{1 - \cos^2 \lambda \sin^2 \beta} \sin(\xi + \theta) \quad (5)$$

ただし、

$$\tan \xi = \tan \lambda \sec \beta \quad (6)$$

θ : 斜面勾配 (南斜面+, 北斜面-), β : 斜面向き (真南または真北からの角度), λ : 太陽南中時の入射角
従って、任意のN地点における日射量は、観測日射量を受光係数で補正することにより次式で得られる。

$$I_N = \frac{S_N}{S_0} I_0 \quad (7)$$

So, I₀: 観測地点での受光係数, 観測日射量

魚野川流域においては日射量データはなく、日照時間が観測されているにとどまっているため、本研究では長岡において観測されている日射量データ (長岡雪氷防災実験研究所)、日照時間データ (AMeDAS) の関係から日照時間データより日射量を算定する手法を開発した。太陽赤緯、地点緯度をそれぞれ δ , ϕ とすれば、日の出・日の入りの時角 ω_0 は太陽高度 $h=0$ より、

$$\cos \omega_0 = -\tan \phi \tan \delta \quad (8)$$

地表・太陽運行の幾何学的条件より単位時間当りの大気外放射量 I_{0h} は、

$$I_{0h} = S_0 (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \frac{\sin \omega_0}{\omega_0}) \quad (9)$$

S₀: 太陽定数 (117cal/cm²/day)

と表される。日照時間より日射量を求める式として一般に用いられている経験式は、

$$I_o = I_{on} \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

ただし a, b : 定数 n : 日照時間 N : 可照時間 n/N : 日照率

と表されている。定数 a, b は大槻らにより1972~1980の統計から与えられており⁴⁾、新潟県内においては、新潟 ($a=0.19, b=0.50$)、高田 ($a=0.21, b=0.44$) とされている。これらの定数は季節変化によって変動することが確認されており、例えば冬期 (2~4月) では定数 b が大きくなるとされている。このため、新潟および高田の値を参考にし、長岡のデータを用いて定数を決めた結果 $a=0.14, b=0.58$ が得られた。このときの結果を図4に示す。本研究では、この長岡で得られた定数を用いて湯沢における日照時間データ (AMeDAS) から流域の日射量を算定した。

次に、融雪量を短期間 (時間単位) で検討するためには、先に示した方法で日照時間から1日当りの日射量を算定した後、日射量の時間配分を行わなくてはならない。内嶋・清野は一日の日射量を時間毎に配分する方法を次式で示している⁵⁾。

$$\begin{aligned} q_s(\omega_t) &= f_s(\omega_t) Q_s & q_d(\omega_t) &= f_d(\omega_t) Q_d \\ f_s(\omega_t) &= A_0 + A_1 \cos \omega_t + A_2 \cos 2\omega_t & f_d(\omega_t) &= B_0 + B_1 \cos \omega_t + B_2 \cos 2\omega_t \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A_0 &= -2.803 \times 10^{-2} + 4.363 \times 10^{-4} h_0 & B_0 &= -8.102 \times 10^{-2} + 1.375 \times 10^{-3} h_0 \\ A_1 &= -1.037 \times 10^{-1} + 2.530 \times 10^{-3} h_0 & B_1 &= 1.690 \times 10^{-1} - 9.220 \times 10^{-4} h_0 \\ A_2 &= 3.484 \times 10^{-1} - 4.012 \times 10^{-3} h_0 & B_2 &= 1.062 \times 10^{-1} - 1.503 \times 10^{-3} h_0 \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 Q_s : 直達日射量、 Q_d : 散乱日射量、 $q_s(\omega_t), q_d(\omega_t)$: 時角 ω_t における直達・散乱日射量
 h_0 : その月の15日における太陽高度

なお、この式を用いるにあたっては Q_s, Q_d の分離は I_{qbal} の式、

$$Q_s / I_o = 0.791 - 0.635(n/N) \quad (13)$$

$$Q_d = I_o - Q_s \quad (14)$$

を用いることとしている⁶⁾。式(11)~(14)により時間日射量 $q_s(\omega_t) + q_d(\omega_t)$ が得られる。しかし、

①太陽が出ている間は日照時間が0であっても日射量は0とはならないという観測事実が表現できない。

②一日中一樣な日照状態では適用できるが、日照時間の変動による影響を表現できない。

という欠点を有する。そこで日照時間が0となっている日の日射量の平均値 $\overline{Q_{min}}$ に $f_s(\omega_t)$ に乗じて得られる散乱日射量 $q_{sb}(\omega_t)$ が散乱日射成分に常時含まれるとする。ただし、

$$q_{sb}(\omega_t) = \overline{Q_{min}} f_s(\omega_t) \quad (15)$$

また、日照時間による重み付けを表す散乱及び直達日射量における配分率をそれぞれ、 x_s, x_d とすると、

$$x_s = \frac{n t f_s(\omega_t)}{\sum n t f_s(\omega_t)} \quad (16)$$

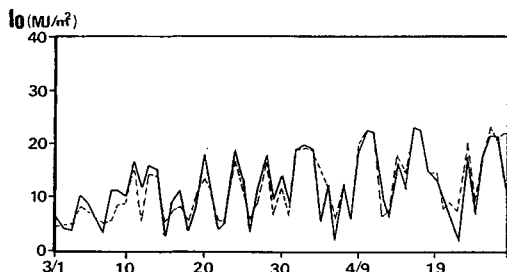


図4. 日射量 (日値) の検証
 1988年 3月~4月 (長岡)
 (実線: 測定値, 破線: 計算値)

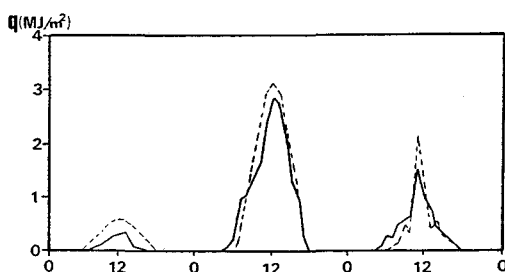


図5. 時間日射量の検証
 1988年 4月22日~24日 (長岡)
 (実線: 測定値, 破線: 計算値)

$$x_d = \frac{n t f_d(\omega t)}{\sum n t f_d(\omega t)} \quad (17)$$

となる。以上より、 t 時における散乱および直達日射量は、

$$q_s'(\omega t) = x_s(Q_s - Q_{\text{min}}) + q_{sb}(\omega t) \quad (18)$$

$$q_d'(\omega t) = x_d Q_d \quad (19)$$

したがって、 t 時の日射量は、

$$i_o = q_s'(\omega t) + q_d'(\omega t) \quad (20)$$

この結果得られた時間日射量との比較を図5に示す。この結果から本手法の適合性が示された。また、気温に関しては観測点との標高差($h_n - h_0$)から気温減率 $\Delta\theta$ を用いて以下のように補正する。

$$T = \Delta\theta(h_n - h_0) \quad (21)$$

以上の分布融雪モデルをLANDSAT MSSデータが得られた日を中心とする期間(一週間)に適用し、水収支式との適合性を検討した結果は図6で、図3と同様に積雪の状態に関わりなく融雪量が算定できることが示され、分布融雪量算定モデルの魚野川流域における適用性が示された。

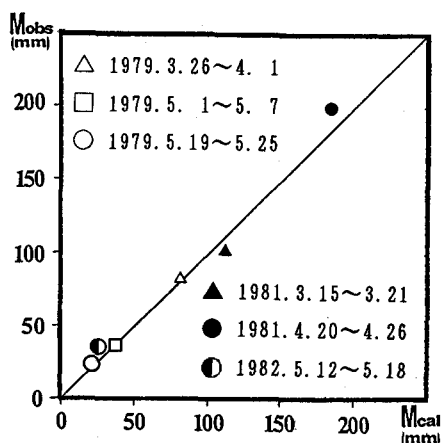


図6. 分布融雪量算定モデルの適用

5. 融雪流出量の算定

河川流出水は概念的に直接流出と基底流出に分けて考えられる。直接流出成分に関しては、入力値である融雪量がメッシュの格子点で計算されることを考慮して、流域内の格子点を結ぶ流路網系を考える。これは格子点の回りの8点から最も勾配が急になる格子点を選び、この間を広幅矩形の仮想流路で結んだものである。流路網の構成は文献7)によった。流路への入力値は格子点のみで考え、流路途中での横流入や降雨入力は考えない。格子点への入力値は Δt 間の融雪量と上流からの流入量であり、下流への伝播はkinematic waveとし、運動方程式はManning則を用いる。なお、粗度係数及び流路幅は各メッシュで異なると思われるが、本研究では簡単のため流域内一定とした。洪水波の追越しの処理も含め、到達時間の計算は上流流路より行い、各流量の下流端の格子点で時間配分を行って、その地点における流量時系列とする³⁾。基底流出成分は集中型として分数関数型の減水式で表し、これを時間について積分した貯留関数を用いた³⁾。減水定数は魚野川流域において降雨終了後一週間以上続いた無降雨日の流量観測資料より得られた値の平均値を時間に換算して求めた。

以上のモデルを魚野川流域に降雨の無い3期間に適用し、図7(a)~(c)に示す結果が得られた。いずれも時間流量をほぼ再現しているが計算流量の変化が実測値に比べて大きいのは、融雪水の積雪層内の移動や、中間流の存在、あるいは特に積雪面積が小さくなったときに基底流出を集中モデルとして扱っていることによると考えられる。なお、計算値のはじめの部分で0.5日程度は実測値とずれているのは直接流出量の遅れ時間に対応している。

6. 結論

本研究により得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 魚野川流域においては積雪水量の高度分布係数 $a=2$ として積雪面積率から流域積雪水量を推定することが可能である。
- (2) 日射量が観測されていない流域であってもアメダスの日照時間データを用いることにより融雪量分布モデルを適用できる。

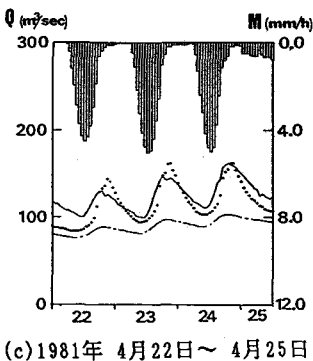
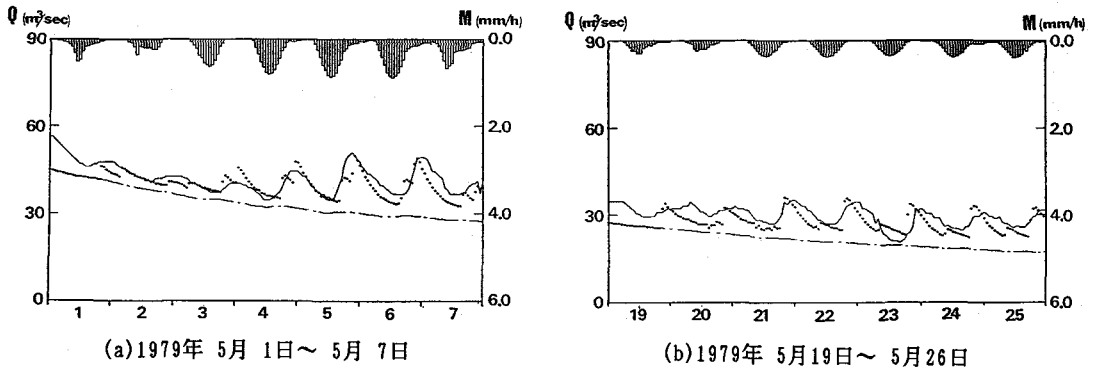


図7. 融雪流出モデルの適用

— 観測流出量
 ---- 計算基底流出量
 ・ 計算流出量

(3)融雪流出量については流出波形がほぼ再現されたが、モデルによる流量の変化の割合が急であることが指摘された。

謝辞

本研究で用いた水文データは建設省北陸地方建設局信濃川工事事務所より、長岡の日射量データは科学技術庁国立防災科学技術センター長岡雪氷防災実験研究所より提供されました。また、本研究は昭和63年度文部省科学研究費奨励研究(A)「水資源としての積雪・融雪情報管理システムの構成」(代表者:小池俊雄)によりました。流路網の構成に当たっては長岡技術科学大学大学院生の陸 旻皎氏に協力を戴きました。ここに記して各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1)小池・高橋・吉野:積雪面積情報による流域積雪水量の算定,土木学会論文集,357/II-4, pp. 159-165, 1985.
- 2)小池・高橋・吉野:融雪量分布のモデル化に関する研究,土木学会論文集,363/II-4, pp. 165-174, 1985.
- 3)高橋・小池・吉野・中谷:融雪量の空間分布を考慮した流出解析,第31回水理講演会論文集, pp. 173-176, 1987.
- 4)大槻・三野・丸山:気象資料から推定したわが国の蒸発散量,農業土木学会論文集,第112号, pp. 25-32, 1984.
- 5)内嶋・清野:複雑地形地(阿蘇カルデラ)における太陽放射資源量の評価,農業気象,41(3), pp. 247-255, 1985.
- 6)大槻・端野:傾斜面を考慮した流域の日射環境評価,水文・水資源学会1988年研究発表会要旨集, pp. 60-63, 1988.
- 7)陸・小池・早川:レーダー雨量情報に対応する分布型流出モデルの検討,第33回水理講演会論文集, 1989.